

Your Ref.: 3007990-0001-PCT-US

Our Ref.: 15894/US

US Patent Application 10/536,699 based on PCT/EP2003/13318  
"Magnetic Logic Device"

**Summary of DE 100 36 356**

DE 100 36 356 discloses a magnetic thin layer component consisting of at least three magnetic partial layers (ref. nos.: 1, 2, 3, see Fig. 1), which are arranged magnetically isolated from each other, wherein the magnetic partial layers (1, 2, 3) have different directions of magnetization ( $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ) such that the directions of magnetizations in the three magnetic partial layers (1, 2, 3) are always perpendicular relative each other. The component includes means (7) for changing the direction of magnetization of at least one of the magnetic partial layers (1, 2, 3) into the opposite direction. The outer magnetic partial layers (1, 3) carry electrical contacts (6).





19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 Patentschrift  
10 DE 100 36 356 C 2

51 Int. Cl.<sup>7</sup>:  
H 01 L 43/08  
H 01 F 10/12  
H 01 L 27/22  
H 01 L 29/82

21 Aktenzeichen: 100 36 356.3-33  
22 Anmeldetag: 20. 7. 2000  
43 Offenlegungstag: 8. 3. 2001  
45 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 14. 3. 2002

DE 100 36 356 C 2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

66 Innere Priorität:  
199 38 373. 1 10. 08. 1999

73 Patentinhaber:  
Institut für Physikalische Hochtechnologie e.V.,  
07745 Jena, DE

74 Vertreter:  
Pfeiffer, R., Dipl.-Phys. Fachphys. f. Schutzrechtsw.,  
Pat.-Anw., 07745 Jena

72 Erfinder:  
Mattheis, Roland, Dipl.-Phys., 07743 Jena, DE

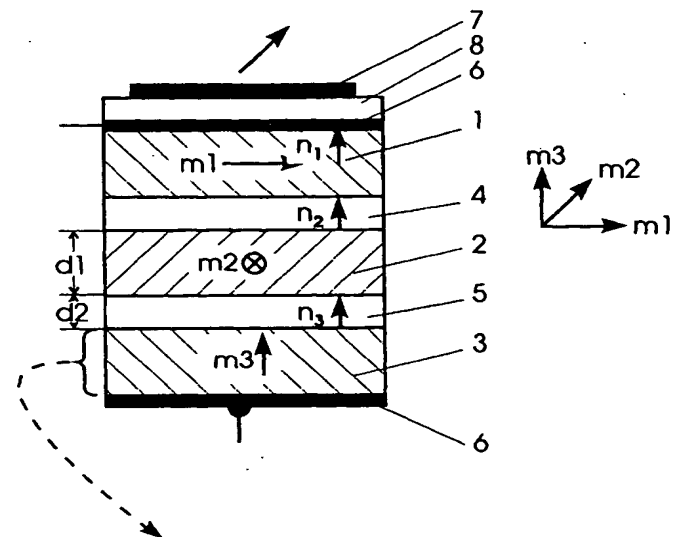
56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

DE 197 01 509 A1  
DE 42 42 358 A1  
US 57 05 973  
US 56 77 625  
US 56 35 835

JP 09-092905 A (abstract);  
JP 08-088424 A (abstract);  
OBERLI, D. et al.: "Total Scattering Cross  
Section and Spin Motion of Low Energy Electrons  
Passing through a Ferromagnet" in "Physical  
Review Letters", 81 (1998) 19, p. 4228-4231;

54 Magnetisches Dünnschichtbaugelement

57 Magnetisches Dünnschichtbaugelement, bestehend aus  
zumindest drei magnetischen Teilschichten (1, 2, 3), die  
voneinander magnetisch isoliert angeordnet sind, wobei  
den magnetischen Teilschichten (1, 2, 3) unterschiedliche  
Magnetisierungsrichtungen ( $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ) derart aufge-  
prägt sind, daß die Magnetisierungsrichtungen in den  
drei magnetischen Teilschichten (1, 2, 3) untereinander je-  
weils stets orthogonal ausgerichtet sind, wobei Mittel (7)  
vorgesehen sind, die die Magnetisierungsrichtung wenig-  
stens einer der magnetischen Teilschichten (1, 2, 3) in die  
entgegengesetzte Richtung umzukehren gestatten und  
die jeweils äußersten magnetischen Teilschichten (1, 3)  
mit einer elektrischen Kontaktierung (6) versehen sind.



DE 100 36 356 C 2



[0001] Die Erfindung betrifft ein magnetisches Dünnschichtbauelement, das sich insbesondere für eine bzgl. der Stromdurchlaßrichtung umschaltbare Diode und daraus aufgebauter frei programmierbarer logischer Arrays einsetzen läßt.

[0002] Derzeit bekannte frei programmierbare logische Gate-Arrays benötigen für die Umschaltgatter Halbleiterbauelemente, die mit Hilfe eines gespeicherten Ladungszustandes die Funktion der Gatter festlegen. Dafür werden ferroelektrische Substanzen verwendet, die prinzipiell in der Lagen sind, eine Ladung über lange Zeit zu speichern und damit einen definierten Zustand stabil zu halten. Nachteil derartiger Anordnungen ist zum einen, daß es bei einer Umprogrammierung zu mechanischen Belastungen der Speicherschicht kommt, was zur Folge hat, daß die Zahl der Umschaltzyklen deutlich begrenzt ist. Darüber hinaus werden für langzeitstabile Speicherelemente große Ladungsmengen und damit große Flächen benötigt, was wiederum die Integrationsdichte derartiger Bauelemente beschränkt.

[0003] Weiterhin sind magnetische Dünnschichtbauelemente, die vorzugsweise als Magnetfeldsensoren Verwendung finden, und die mehrere magnetische Schichten beinhalten bspw. aus DE 197 01 509 A1; DE 42 43 358 A1; US 5,705,973; US 5,635,835; US 5,677,625 und JP 08-088 424 A bekannt. Ferner wird in JP 09-092 905 A beschrieben, daß in Mehrlagenschichten durch Nutzung von inneren mechanischen Spannungen in Kombination mit der Magnetostriktion die Richtung der Magnetisierung ausschließlich in der Schichtebene der Einzellagen wahlfrei einstellbar ist. Vorstehend genannte Schriften geben jedoch keinen Hinweis auf vorliegende Erfindung.

[0004] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, magnetische Dünnschichtbauelemente vorzuschlagen, die einerseits kompatibel zu bekannten Halbleiteranordnungen und -technologien sein sollen und eine hohe Integrationsdichte ermöglichen. Andererseits sollen diese Dünnschichtbauelemente eine hohe Langzeitstabilität aufweisen und damit alle Effekte, die zum Ermüdungsverhalten nach dem Stand der Technik vergleichbarer ferroelektrischer Anordnungen führen, vermeiden.

[0005] Die Erfindung nutzt die Abhängigkeit des Widerstandes eines Schichtsystems, bestehend aus ferro- und nichtferromagnetischen Schichten. Der elektrische Widerstand einer solchen Anordnung ist groß, wenn die Richtung der Magnetisierung benachbarter Magnetschichten antiparallel ist und klein, wenn die Richtung der Magnetisierung benachbarter Magnetschichten parallel ist. Dies wird schon für magnetoresistive Sensoren sowie potentiell für MRAMs (magnetischer RAM) ausgenutzt. Dabei tritt der genannte Effekt auf, wenn der Strom sowohl in CIP (Current in-plane) als auch in CPP (Current perpendicular plane) fließt. Die vorliegende Erfindung bedient sich eines weiteren Effektes, nämlich der Drehung der Richtung des Spins eines Elektrons beim Durchgang durch eine ferromagnetische Schicht, so wie es von Oberli et al. (Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 4228-4231), für spinpolarisierte Elektronen, die im Vakuum erzeugt werden und deren Transmission durch eine freitragende ferromagnetische Schicht bestimmt wurde, beschrieben ist. Diese Drehung tritt genau dann auf, wenn die Richtung des Spins des Elektrons senkrecht auf der Richtung der Magnetisierung einer ferromagnetischen Schicht steht. Bei dem Durchgang der Elektronen tritt eine linear von der Länge des Weges abhängige Drehung auf, die bei Cobalt etwa 90° bezogen auf 6 µm Schichtdicke beträgt. Diese Drehung soll in einem erfindungsgemäßen Dünnschichtbauelement, bestehend aus zumindest drei magnetischen Teil-

schichten, die durch nichtmagnetische Schichten getrennt sind, zur praktischen Anwendung gelangen. Die Funktion der nichtmagnetischen Schichten 4, 5 besteht ausschließlich darin, eine direkte magnetische Wechselwirkung zwischen den magnetischen Teilschichten 1, 2, 3 auszuschließen, d. h. die Richtungen der Magnetisierungen m1, m2, m3 wahlfrei einstellen zu können. Sie müssen außerdem gewährleisten, daß die Richtung des Spins der Elektronen, die in diese Schichten aus den ferromagnetischen Teilschichten eintreten, während des Durchlaufens nicht geändert wird. Dies kann einerseits dadurch gewährleistet werden, daß diese Schichten ultradünn sind. Dies bedeutet z. B. für Isolatorschichten typische Dicken zwischen 1-3 nm. Analoges gilt für gut leitfähige metallische Schichten. Je nach Material (z. B. Cu, Ag, Au) sollte hier die Dicke zwischen 1-6 nm liegen. Bei Verwendung halbleitender Schichten kann sie aber auch deutlich größer sein (5-1000 nm), wenn durch z. B. eine sehr hohe Beweglichkeit und niedrige Elektronendichte ein ballistischer Transport über große Wegstrecken erreicht werden kann, z. B. in Form eines 2DEG (2dim. Elektronengas). Im Rahmen der Erfindung kommen bei der Betrachtung eines einzelnen Bauelements mindestens drei magnetische Teilschichten 1, 2, 3 zum Einsatz. Dabei zeigen die Fig. 1, 2 und 4 stark schematisiert unterschiedliche Anordnungsmöglichkeiten der vorgesehenen magnetischen Teilschichten. Die erste und nach außen mit einer elektrischen Kontaktierung 6 versehene ferromagnetische Teilschicht 1 ist für die Injektion eines hinreichend stark polarisierten Stromes verantwortlich, die durch eine unterschiedliche Dichte der Elektronen, deren Spin parallel bzw. antiparallel zur homogenen Magnetisierung m1 der Schicht verursacht wird. Die zweite ferromagnetische Teilschicht 2, deren Magnetisierung m2 senkrecht zur Magnetisierung m1 der ersten Teilschicht 1 aufgebracht ist, bewirkt die Drehung der Richtung des Spins, und zwar senkrecht zur Magnetisierungsrichtung m2 dieser Teilschicht und senkrecht zur Ausgangsspinrichtung des polarisierten Stromes. Die Dicke dieser zweiten Teilschicht ist so zu wählen (z. B. für Co ca. 6 nm), daß die Drehung der Richtung des Spins 90° beträgt. Die Richtung der Magnetisierung m3 der dritten ferromagnetischen Teilschicht 3 ist derart aufgebracht, daß sie wiederum senkrecht zur Richtung der Magnetisierung der ersten und der zweiten Teilschicht 1, 2 steht. Dadurch ergibt sich, daß der Spin der polarisierten Elektronen beim Eintritt in die dritte magnetische Teilschicht entweder parallel oder antiparallel zur Richtung der Magnetisierung in dieser Teilschicht steht. Je nach paralleler oder antiparalleler Stellung ergibt sich damit ein hoher oder niedriger elektrischer Widerstand des gesamten, die magnetischen Teilschichten 1, 2, 3 beinhaltenden Schichtsystems. Fließt der Strom in der entgegengesetzten Richtung, d. h. von der dritten magnetischen Teilschicht in die zweite und erste, ergibt sich analog zum vorstehend beschriebenen Fall in der mittleren magnetischen Teilschicht 2 eine Drehung der Richtung des Spins um 90° und damit eine parallele oder antiparallele Stellung der Richtung der Polarisation der Elektronen zur Richtung der Magnetisierung in der ersten magnetischen Teilschicht, woraus wiederum ein hoher oder niedriger elektrischer Widerstand des gesamten Schichtsystems folgt. Bei Vergleich der beiden Stromrichtungen stellt man fest, daß der Widerstand bei Stromfluß in Richtung 1-2-3 in Betrag genau das entgegengesetzte Verhalten zum Stromfluß 3-2-1 aufweist, d. h. ist der Widerstand in Richtung 1-2-3 niedrig, so ist er für 3-2-1 hoch und umgekehrt.

[0006] Damit hat die beschriebene Anordnung die Funktion einer Diode. Schaltet man durch ein äußeres Magnetfeld, was in den Beispielen nach den Fig. 1 und 2 durch einen, über einer elektrischen Isolatorschicht 8 aufgetragenen



und mit einem Stromimpuls beaufschlagbaren Streifenleiter 7 bewerkstelligt werden kann, die Richtung der Magnetisierung genau einer magnetischen Teilschicht um, wobei es gleichgültig ist, welche der Teilschichten die Richtung der Magnetisierung um  $180^\circ$  umkehrt, es wird im Normalfall die mit der kleinsten Anisotropiefeldstärke sein, so wird aus der Durchlaß eine Sperr-Richtung und aus der gesperrten Richtung die Durchlaßrichtung. Damit ist die angestrebte Funktion einer magnetisch schaltbaren Diode realisiert. Es liegt im Rahmen des vorstehend beschriebenen Beispiels, daß auch zwei oder drei Magnetisierungsrichtungen umgeschaltet werden können. Als Materialien für die genannten magnetischen Teilschichten 1, 2, 3 kommen bspw. nach dem Stand der Technik bekannte epitaxiale Schichten, wie La-Perovskite, in einem Magnetfeld abgeschiedene Permalloy-schichten oder auch Sandwichaufbauten, wie in Fig. 3 schematisch angedeutet, zum Einsatz. Sind bei letzteren die jeweiligen Co-Schichten sehr dünn ( $\leq 1$  nm), dann ergibt sich aufgrund der starken Grenzflächenanisotropie eine spontan senkrechte Magnetisierung der magnetischen Teilschicht, im Beispiel der Fig. 1 der Teilschicht 3.

[0007] Die vorstehend beschriebene Diodenfunktion setzt die Spinerhaltung beim Durchgang durch die nichtferromagnetischen Schichten 4, 5 voraus, was durch o. g. Schichtdicken bzw. Kanallängen gegeben ist. Durch die große mögliche Kanallänge (vgl. bspw. Fig. 2) in Halbleiterstrukturen ist ein Einsatz derartiger Anordnungen zu integrierten logischen Strukturen gegeben. Im Falle eines Aufbaus von z. B. AND- oder OR-Gattern mit derartigen Strukturen gelingt es, durch die Umschaltung der Richtung der Magnetisierung einer der magnetischen Teilschichten die Art des Gatters zu wechseln (AND wird z. B. NAND). Damit können derartige Anordnungen benutzt werden, um FPLGAs (frei programmierbare logische Gate-Arrays) aufzubauen, die magnetisch programmierbar sind. Im Falle einer vertikalen Anordnung dreier magnetischer Teilschichten, bspw. nach Fig. 1, und einer mehrfachen Anordnung solcher Schichtpakete in einem Array lassen sich hochintegrierte Anordnungen schaffen. Die magnetischen Eigenschaften der beschriebenen magnetischen Dünnschichtanordnung sind bis in den tiefen sub- $\mu$ m-Bereich skalierbar, wodurch deutlich höhere Integrationsdichten erreichbar sind, als sie bei FPLGAs nach dem heutigen Stand der Technik möglich sind.

[0008] Alle in der Beschreibung, den nachfolgenden Ansprüchen und den Zeichnungen dargestellten Merkmale können sowohl einzeln als auch in beliebiger Kombination miteinander erfindungswesentlich sein.

#### Patentansprüche

1. Magnetisches Dünnschichtbauelement, bestehend aus zumindest drei magnetischen Teilschichten (1, 2, 3), die voneinander magnetisch isoliert angeordnet sind, wobei den magnetischen Teilschichten (1, 2, 3) unterschiedliche Magnetisierungsrichtungen ( $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ) derart aufgeprägt sind, daß die Magnetisierungsrichtungen in den drei magnetischen Teilschichten (1, 2, 3) untereinander jeweils stets orthogonal ausgerichtet sind, wobei Mittel (7) vorgesehen sind, die die Magnetisierungsrichtung wenigstens einer der magnetischen Teilschichten (1, 2, 3) in die entgegengesetzte Richtung umzukehren gestatten und die jeweils äußersten magnetischen Teilschichten (1, 3) mit einer elektrischen Kontaktierung (6) versehen sind.

2. Magnetisches Dünnschichtbauelement nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetisierungsrichtungen ( $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ) parallel oder antiparallel oder orthogonal zu den zugehörigen Normalen ( $n_1$ ,

$n_2$ ,  $n_3$ ) der jeweiligen magnetischen Teilschichten (1, 2, 3) verlaufend festgelegt sind.

3. Magnetisches Dünnschichtbauelement nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens einer der drei magnetischen Teilschichten eine spontan senkrechte Magnetisierung aufgeprägt ist, wohingegen die verbleibenden magnetischen Teilschichten eine Magnetisierung in der Schichtebene (in-plane) aufweisen.

4. Magnetisches Dünnschichtbauelement nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß der zwischen zwei magnetischen Teilschichten (1, 3) angeordneten magnetischen Teilschicht (2) eine solche Dicke ( $d_1$ ) oder Länge ( $l_1$ ) gegeben ist, die gewährleistet, daß die Spinpolarisation der sie durchlaufenden Elektronen eine Drehung um  $90^\circ$  erfährt.

5. Magnetisches Dünnschichtbauelement nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die magnetischen Teilschichten (1, 2, 3) übereinander gestapelt angeordnet sind und benachbarte magnetischen Teilschichten voneinander durch isolierende, halbleitende und/oder metallische nichtferromagnetische Schichten (4, 5) beabstandet sind.

6. Magnetisches Dünnschichtbauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß zwei magnetische Teilschichten (1, 2) übereinander angeordnet sind, von denen einer eine senkrechte Magnetisierung parallel oder antiparallel zur jeweiligen Schichtnormalen aufgeprägt ist und das mindestens eine weitere magnetische Teilschicht (3) lateral benachbart angeordnet ist, wobei benachbarte magnetischen Teilschichten voneinander durch isolierende, halbleitende und/oder metallische nichtferromagnetische Schichten (4, 5) beabstandet sind.

7. Magnetisches Dünnschichtbauelement nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, daß den isolierenden und/oder metallischen nichtferromagnetischen Schichten (4, 5), die benachbart angeordnete magnetische Teilschichten voneinander trennen, eine Dicke ( $d_2$ ) oder Länge ( $l_2$ ) in der Größenordnung von 1 bis 6 nm gegeben ist.

8. Magnetisches Dünnschichtbauelement nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, daß den halbleitenden Schichten (4, 5), die benachbart angeordnete magnetische Teilschichten voneinander trennen, eine Dicke ( $d_2$ ) oder Länge ( $l_2$ ) in der Größenordnung von 5 bis 1000 nm gegeben ist.

9. Magnetisches Dünnschichtbauelement nach einem oder mehreren der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das magnetische Dünnschichtbauelement als eine in der Stromdurchlaßrichtung magnetisch umschaltbare Diode verwendet wird.

10. Magnetisches Dünnschichtbauelement nach einem oder mehreren der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere auf einem Substrat angeordnete magnetische Dünnschichtbauelemente, die als magnetisch in ihrer Stromdurchlaßrichtung umschaltbare Dioden gebildet sind, in frei programmierbaren logischen Gate-Arrays eingesetzt werden.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen



- Leerseite -



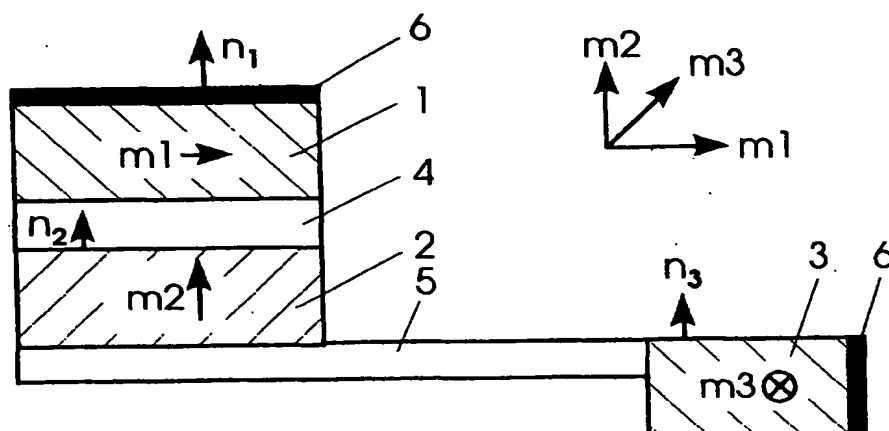


Fig. 4



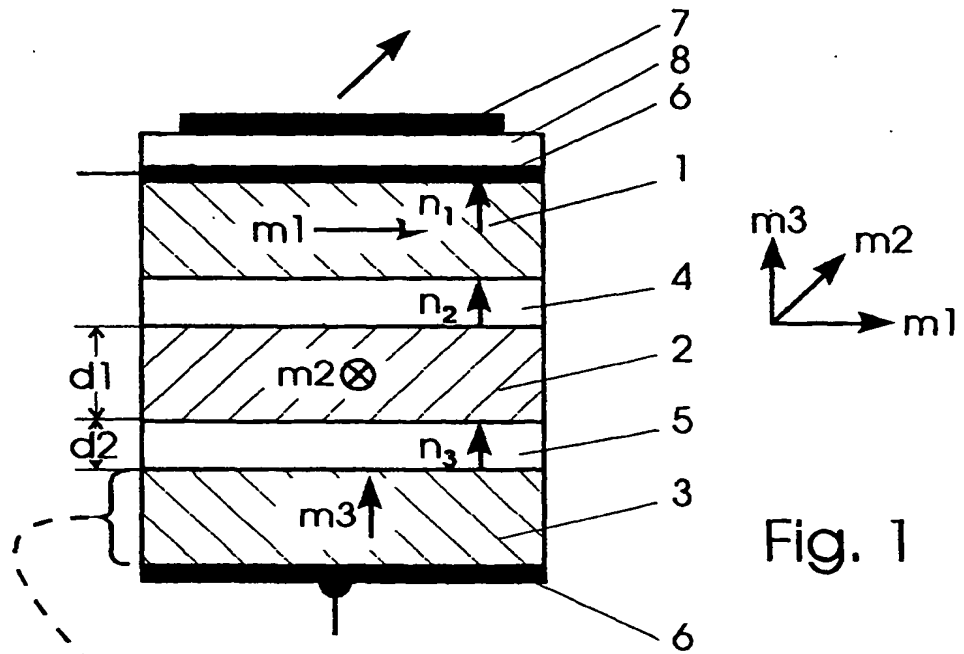


Fig. 1

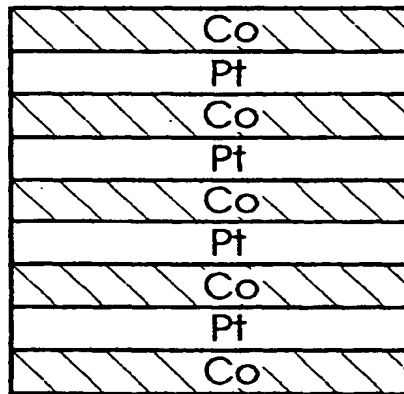


Fig. 3

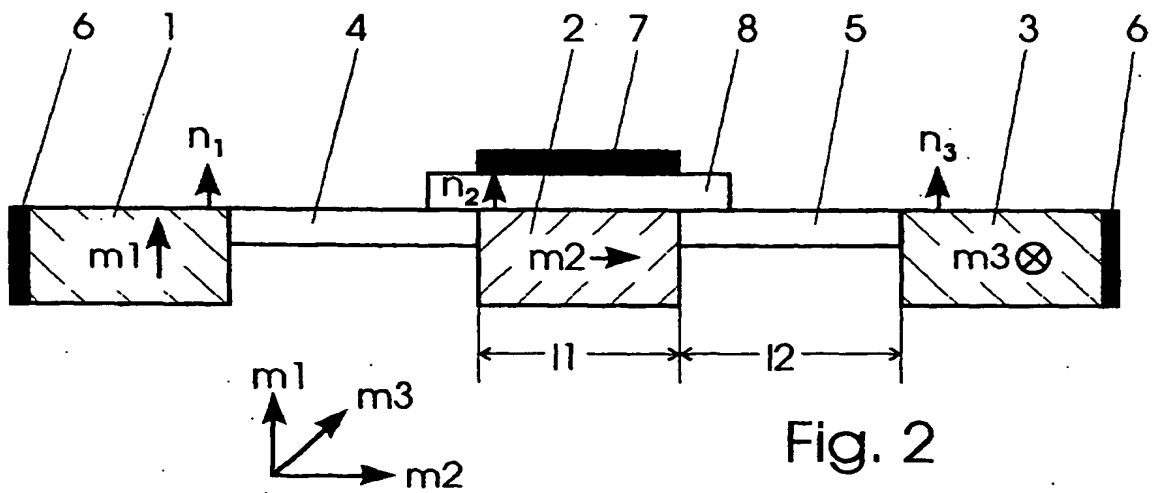


Fig. 2